

# KINETIKA REAKSI OKSIDASI PIRIT DALAM LARUTAN FERI KHLORIDA PADA REAKTOR TANGKI BERPENGADUK

Tuti Indah Sari<sup>1)</sup>, Harry Sulisty<sup>2)</sup>, Sri Warnijati Agra<sup>2)</sup>

## ABSTRACT

Rock mining residue and peat soil containing pyrite can produce acid waste that cause environmental pollution. Oxidation of pyrite in aqueous ferric chloride is one of the method used to reduce acid waste. Reaction kinetics data are needed to design a reactor.

The objective of this research was to study the kinetics and the effect of the various variables affecting the oxidation of pyrite in ferric chloride solution. The process was carried out in semi batch stirred tank reactor. The variables studied were temperature, molar ratio of ferric chloride-pyrite, and the size of particle. Experiment was carried out at a certain time and samples were taken periodically and analyzed for their sulfate, ferro and total iron concentrations.

The results showed that the reaction kinetics could be approached with a combination of the liquid-gas model: reaction of ferro chloride and oxygen and the solid-liquid reaction model: reaction of pyrite and ferric chloride according to Shrinking Core Model. Reaction kinetics was controlled by chemical reaction and the formation of ferric chloride was the controlling step. The effect of temperature could be expressed by Arrhenius equation with activation energy for pyrite and ferric chloride reaction,  $E_1$  of 9811.258 cal/mole and for ferro chloride and oxygen reaction,  $E_2$  of 4995.278 cal/mole. Mole ratio of ferric chloride-pyrite and solid particle size affected the rate constants logarithmically. The effect of temperature, mole ratio of ferric chloride-pyrite and solid particle size on  $k_1$  and  $k_2$  could be presented as:

$$k_1 = 152.436e^{(-9697.004/RT)} M^{0.504} R_b^{-0.146} \text{ ,cm/menit}$$

$$k_2 = 2312.865e^{(-5116.914/RT)} M^{1.405} \text{ ,(cm}^3\text{/mmol)}^2\text{/menit}$$

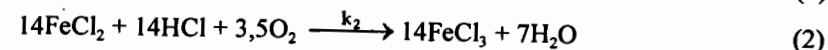
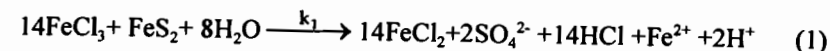
under the process condition of 313 to 343 K,  $M = 8$  to 24,  $R_b = 2.025 \times 10^{-3}$  to  $1.058 \times 10^{-2}$  cm.

**Keywords :** Ferric Chloride, Oxidation of Pyrite, Pyrite, Shrinking Core Model

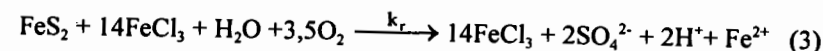
## PENGANTAR

Senyawa pirit ( $\text{FeS}_2$ ) banyak terdapat di Indonesia. Pirit sering ditemukan pada penambangan emas, tembaga dan lahan gambut. Pada kondisi tertentu, pirit akan teroksidasi sendiri dengan bantuan bakteri dalam tanah membentuk asam sulfat sehingga dapat mencemari lingkungan.

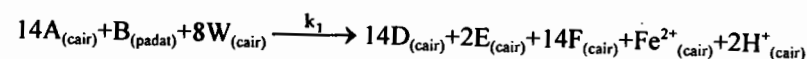
Penelitian mengenai reaksi oksidasi pirit telah banyak dilakukan baik dengan proses biokimia maupun proses kimia. Reaksi oksidasi pirit dalam larutan feri khlorida dapat didekati dengan persamaan sebagai berikut:



Reaksi keseluruhan adalah:



## Reaksi (1)



Untuk mengetahui langkah mana yang mengontrol reaksi ini digunakan model matematis untuk Shrinking Core Model (Levenspiel, 1999).

1. Apabila difusi melalui lapisan cairan yang mengontrol

$$t = \tau \left[ 1 - (1 - X_B)^{2/3} \right] \quad \tau = \frac{7\rho_B R_b^2}{C_{AL} D_A} \quad (4)$$

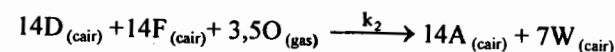
2. Apabila reaksi kimia mengontrol

$$t = \tau \left[ 1 - (1 - X_B)^{1/3} \right] \quad \tau = \frac{14\rho_B R_b}{k_1 C_{AL}} \quad (5)$$

3. Jika kedua langkah menentukan kecepatan reaksi

$$t_t = t_{dc} + t_{rk} \quad (6)$$

## Reaksi (2)



Persamaan reaksi (2) ini merupakan reaksi heterogen antara cair dan gas, gas mendifusi ke cairan, terjadi reaksi di fase cair (Smith, 1981).

1. Perpindahan massa yang mengendalikan

$\text{O}_2$  yang masuk ke cairan akan segera bereaksi dengan fero khlorida, sehingga harga konsentrasi  $\text{O}_2$  dalam cairan,  $C_{\text{OL}} \approx 0$ . Kecepatan reaksi kimia selalu dikontrol oleh perpindahan massa  $\text{O}_2$ :

<sup>1)</sup> Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, Palembang

<sup>2)</sup> Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

$$\frac{dC_D}{dt} = -k_L a_g \left( \frac{C_{Og}}{H} \right) + 14k_1 C_{AL} \quad (7)$$

## 2. Reaksi kimia yang mengendalikan

Asumsi selalu tercapai keadaan seimbang antara  $O_2$  pada fase gas dan fase cair. Karena  $C_{OL} = C_{OIL}$  dan  $C_{OL} = C_{Og}/H$ :

$$\frac{dC_D}{dt} = -4k_2 C_D^2 \frac{C_{Og}}{H} + 14k_1 C_{AL} \quad (8)$$

## 3. Perpindahan massa dan reaksi kimia yang mengendalikan

$$\frac{dC_{OL}}{dt} = k_L a_g \left( \frac{C_{Og}}{H} - C_{OL} \right) - (k_2 C_D^2 C_{OL}) \quad (9)$$

$$\frac{dC_D}{dt} = -4k_2 C_D^2 C_{OL} + 14k_1 C_{AL} \quad (10)$$

$$\text{Kondisi batas: } t = 0, C_O = 0, C_D = C_{D0} \quad (11)$$

## CARA PENELITIAN

Batuan pirit diperoleh dari daerah Wonogiri, Jawa Tengah. Hasil analisisnya adalah Fe 49,88%, S 40,50%,  $SiO_2$  7,35%,  $H_2O$  0,38%, sisanya 1,89% berupa pengotor. Bahan lain adalah Feri khlorida dalam bentuk  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ , Udara tekan diperoleh dengan menggunakan kompresor.

Reaktor dibuat dari labu leher tiga dengan volume 500  $cm^3$  dilengkapi dengan pengaduk mercury, termometer, pendistribusi udara, water bath, pendingin dan pengambil cuplikan.

Mula-mula reaktor diisi dengan larutan feri khlorida dengan konsentrasi dan volume tertentu. Larutan dipanaskan sampai kondisi suhu tertentu. Setelah pengaduk diputar dan udara dimasukkan lewat pendistribusi udara, pirit dengan berat dan ukuran tertentu dimasukkan ke dalam reaktor dan reaktor ditutup dengan pendingin air. Proses berlangsung batch dan isothermal dengan pengambilan cuplikan satu jam pertama 20 menit sekali, setelah itu cuplikan diambil setiap 60 menit. Cuplikan dianalisis untuk menentukan kadar sulfat dan besi total dengan metoda gravimetri, sedangkan analisis kadar fero dengan metoda titrasi permanganometri (Vogel, 1978).

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Pengaruh suhu reaksi

Perubahan konversi pirit ( $X_B$ ) dan perubahan konsentrasi  $C_D$  terhadap waktu pada berbagai suhu dapat dilihat pada daftar I dan II.

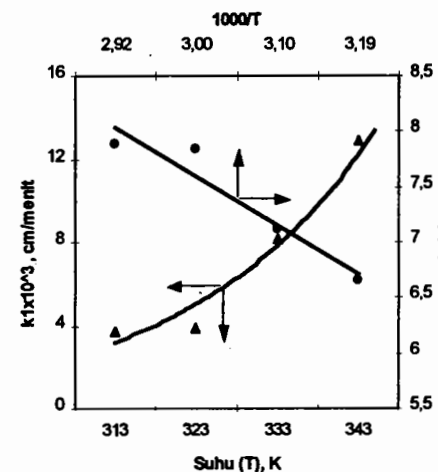
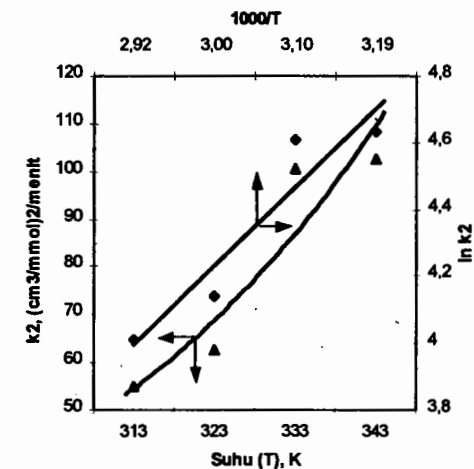
**Daftar I. Pengaruh suhu dan waktu terhadap konversi pirit**  
( $C_{AL}$  0,5 mmol/ $cm^3$  (400  $cm^3$ ),  $G = 326$   $cm^3$ /menit,  $N=700$  rpm,  $M=24$ ,  $R_b = 2,025 \times 10^{-3}$  cm)

Suhu K	Waktu menit	$X_B$ , data	$X_B$ , hitung, untuk		
			Regim campuran	Regim kimia	Regim fisis
313	0	0,000000	0,000000	0,058051	0,057980
	20	0,079886	0,017391	0,067163	0,066947
	40	0,097488	0,034581	0,076216	0,075886
	60	0,105612	0,051569	0,085211	0,084796
	120	0,121860	0,101342	0,111843	0,111353
	180	0,142169	0,149349	0,137953	0,137648
	240	0,169249	0,195623	0,163547	0,163678
	300	0,170603	0,240194	0,188629	0,189441
Ralat, %			38,884	10,273	10,525
$k_1$			$6,950 \times 10^{-4}$	$3,747 \times 10^{-4}$	-
$\phi_A$			$1,595 \times 10^{-4}$	-	$7,307 \times 10^{-7}$
323	0	0,000000	0,000000	0,082282	0,081928
	20	0,111028	0,021882	0,091645	0,091166
	40	0,124568	0,043443	0,100944	0,100372
	60	0,144877	0,064687	0,110180	0,109546
	120	0,155709	0,126532	0,137507	0,136882
	180	0,166541	0,185600	0,164268	0,163932
	240	0,188205	0,241953	0,190470	0,190693
	300	0,199037	0,295654	0,216119	0,217162
Ralat, %			44,007	10,402	10,723
$k_1$			$8,752 \times 10^{-4}$	$3,918 \times 10^{-4}$	-
$\phi_A$			$2,175 \times 10^{-4}$	-	$7,593 \times 10^{-7}$
333	0	0,000000	0,000000	0,104556	0,104728
	20	0,146231	0,034443	0,123686	0,123124
	40	0,181435	0,068090	0,142541	0,141393
	60	0,194975	0,100952	0,161124	0,159533
	120	0,236949	0,194910	0,215258	0,213171
	180	0,266737	0,282120	0,267011	0,265617
	240	0,320897	0,362828	0,316437	0,316843
	300	0,341207	0,437279	0,363590	0,366819
Ralat, %			35,982	8,928	9,409
$k_1$			$1,390 \times 10^{-3}$	$8,168 \times 10^{-4}$	-
$\phi_A$			$2,175 \times 10^{-4}$	-	$1,528 \times 10^{-6}$
343	0	0,000000	0,000000	0,128424	0,129608
	20	0,174665	0,048594	0,157903	0,157203
	40	0,222055	0,095625	0,186710	0,184501
	60	0,265383	0,141116	0,214852	0,211498
	120	0,329021	0,268585	0,295368	0,290646
	180	0,381826	0,383040	0,370183	0,366952
	240	0,440048	0,485122	0,439505	0,440308
	300	0,473898	0,575483	0,503545	0,510588
Ralat, %			32,325	8,026	8,821
$k_1$			$2,046 \times 10^{-3}$	$1,287 \times 10^{-3}$	-
$\phi_A$			$7,975 \times 10^{-5}$	-	$2,318 \times 10^{-6}$
			$k_1$ , cm/menit	$\phi_A$ , $cm^2$ /menit	

## Daftar II. Pengaruh suhu dan waktu terhadap konsentrasi fero

(C<sub>AL</sub>=0,5 mmol/cm<sup>3</sup> (400 cm<sup>3</sup>), G=326 cm<sup>3</sup>/menit, N=700 rpm, M=24, R<sub>p</sub>=2,025x10<sup>-3</sup> cm)

Suhu, K	Waktu, menit	C <sub>D</sub> , data, mmol/cm <sup>3</sup>	C <sub>D</sub> , hitung, mmol/cm <sup>3</sup> untuk		
			Regim campuran	Regim kimia	Regim fisis
313	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	20	0,00932	0,00313	0,00640	0,00542
	40	0,01585	0,00627	0,01257	0,01083
	60	0,01944	0,00940	0,01830	0,01625
	120	0,02121	0,01877	0,02345	0,02166
	180	0,02769	0,02810	0,02793	0,02708
	240	0,02928	0,03736	0,03173	0,03249
	300	0,03712	0,04653	0,03489	0,03791
Ralat, %			34,916	11,946	15,347
k <sub>2</sub>			4,100	55,093	-
k <sub>L</sub> a <sub>g</sub>			0,270	-	7,684x10 <sup>-2</sup>
323	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	20	0,01003	0,00395	0,00679	0,00567
	40	0,01674	0,00789	0,01329	0,01133
	60	0,02192	0,01183	0,01929	0,01700
	120	0,02286	0,02359	0,02462	0,02267
	180	0,02800	0,03523	0,02919	0,02834
	240	0,03028	0,04670	0,03301	0,03400
	300	0,03872	0,05795	0,03613	0,03967
Ralat, %			41,787	13,225	16,431
k <sub>2</sub>			8,005	62,849	-
k <sub>L</sub> a <sub>g</sub>			0,250	-	9,463x10 <sup>-2</sup>
333	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	20	0,01532	0,00627	0,01790	0,01053
	40	0,02592	0,01253	0,03313	0,02106
	60	0,03888	0,01878	0,04439	0,03159
	120	0,04672	0,03739	0,05189	0,04212
	180	0,05592	0,05572	0,05655	0,05265
	240	0,05927	0,07369	0,05931	0,06318
	300	0,06687	0,09123	0,06091	0,07370
Ralat, %			34,793	11,426	14,472
k <sub>2</sub>			9,001	100,532	-
k <sub>L</sub> a <sub>g36</sub>			0,200	-	0,683
343	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	20	0,03741	0,00922	0,02780	0,01437
	40	0,04478	0,01844	0,04957	0,02873
	60	0,04831	0,02763	0,06360	0,04310
	120	0,06481	0,05494	0,07150	0,05746
	180	0,07188	0,08185	0,07566	0,07182
	240	0,07954	0,10843	0,07776	0,08619
	300	0,09191	0,13475	0,07880	0,10055
Ralat, %			41,121	14,299	19,632
k <sub>2</sub>			11,000	102,650	-
k <sub>L</sub> a <sub>g</sub>			0,080	-	1,320

k<sub>2</sub>, (cm<sup>3</sup>/mmol)<sup>2</sup>/menitk<sub>L</sub>a<sub>g</sub>, 1/menitHubungan k<sub>1</sub> dan k<sub>2</sub> dengan suhu reaksiGambar 3. Hubungan suhu reaksi dengan k<sub>1</sub>Gambar 4. Hubungan suhu reaksi dengan k<sub>2</sub>

Hubungan  $\ln k_1$  dan  $\ln k_2$  dengan  $1000/T$  yang terlukis pada gambar 3 dan gambar 4, menunjukkan hubungan garis lurus. Dari persamaan Arrhenius (Johnstone and Thring, 1957) didapat persamaan:

$$k_1 = 2091,839e^{-4937,724/T} \quad \text{dengan } E_1 = 9811,258 \text{ cal/mol} \quad (12)$$

$$k_2 = 166272,785e^{-2513,980/T} \quad \text{dengan } E_2 = 4995,278 \text{ cal/mol} \quad (13)$$

Terlihat bahwa  $E_1$  lebih besar dari  $E_2$ , ini menunjukkan bahwa reaksi (1) lebih sukar bereaksi dibandingkan dengan reaksi (2). Namun bila dilihat pada peningkatan  $k_1$  dari suhu 313 hingga 343 K sebanyak 243,507% dibandingkan dengan  $k_2$  yang hanya 86,320%, menunjukkan bahwa reaksi (1) lebih cepat dibandingkan reaksi (2), sehingga kinetika ditentukan oleh reaksi (2). Hal ini juga terbukti dengan masih adanya ion fero dalam hasil. Kesimpulan ini juga diperkuat oleh penelitian yang dilakukan Mulyadi dan Agra (1988) yaitu oksidasi pirit ion fero dalam larutan feri sulfat.

## Pengaruh Perbandingan Mol Feri khlorida-Pirit (M)

Pada daftar III terlihat bahwa semakin kecil perbandingan mol feri khlorida-pirit (M), konversi pirit dan  $k_1$  semakin menurun. Hal ini disebabkan oleh terbatasnya daya larut pirit dan reaksi kimia yang berlangsung di permukaan padatan. Makin kecil nilai M, semakin besar konsentrasi pirit dalam larutan sehingga semakin besar pula pirit yang belum sempat bereaksi, akibatnya konversi pirit menurun. Hal ini sesuai seperti yang dilakukan oleh King (1977), Mulyadi dan Agra (1988).

**Daftar III.** Pengaruh perbandingan mol feri khlorida-pirit (M) dan waktu terhadap konversi pirit

( $C_{AL}=0,5 \text{ mmol/cm}^3$  (400  $\text{cm}^3$ ),  $G=326 \text{ cm}^3/\text{menit}$ ,  $N=700 \text{ rpm}$ ,  
 $T=343 \text{ K}$ ,  $R_p=2,025 \times 10^{-3} \text{ cm}$ )

M	Waktu menit	$X_B, \text{data}$	$X_B, \text{hitung, untuk}$		
			Regim campuran	Regim kimia	Regim fisis
24	0	0,000000	0,000000	0,128424	0,129608
	20	0,174665	0,048594	0,157903	0,157203
	40	0,222055	0,095625	0,186710	0,184501
	60	0,265383	0,141116	0,214852	0,211498
	120	0,329021	0,268585	0,295368	0,290646
	180	0,381826	0,383040	0,370183	0,366952
	240	0,440048	0,485122	0,439505	0,440308
	300	0,473898	0,575483	0,503545	0,510588
Ralat, %			32,325	8,026	8,821
$k_1$			$2,046 \times 10^{-3}$	$1,287 \times 10^{-3}$	-
$\mathcal{D}_A$			$7,975 \times 10^{-5}$	-	$2,318 \times 10^{-6}$
12	0	0,000000	0,000000	0,099774	0,099937
	20	0,135399	0,034680	0,120243	0,119583
	40	0,159094	0,068551	0,140399	0,139085
	60	0,199714	0,101623	0,160245	0,158439
	120	0,249812	0,196135	0,217946	0,215616
	180	0,294494	0,283793	0,272941	0,271436
	240	0,325636	0,364850	0,325296	0,325865
	300	0,341884	0,439563	0,375075	0,378866
Ralat, %			35,164	9,074	9,666
$k_1$			$1,390 \times 10^{-3}$	$8,713 \times 10^{-4}$	-
$\mathcal{D}_A$			$4,785 \times 10^{-4}$	-	$1,629 \times 10^{-6}$
8	0	0,000000	0,000000	0,092515	0,092503
	20	0,128630	0,029698	0,109347	0,108797
	40	0,149842	0,058802	0,125969	0,124992
	60	0,172860	0,087319	0,142383	0,141087
	120	0,214834	0,169401	0,190389	0,188772
	180	0,257710	0,246408	0,236569	0,235541
	240	0,274861	0,318502	0,280959	0,281374
	300	0,298330	0,385845	0,323594	0,326253
Ralat, %			36,843	9,853	10,355
$k_1$			$1,182 \times 10^{-3}$	$7,116 \times 10^{-4}$	-
$\mathcal{D}_A$			$2,393 \times 10^{-2}$	-	$1,346 \times 10^{-6}$

$k_1, \text{ cm/menit}$        $\mathcal{D}_A, \text{ cm}^2/\text{menit}$

**Daftar IV.** Pengaruh perbandingan mol feri khlorida-pirit (M) dan waktu terhadap konsentrasi fero

( $C_{AL}=0,5 \text{ mmol/cm}^3$  (400  $\text{cm}^3$ ),  $G=326 \text{ cm}^3/\text{menit}$ ,  $N=700 \text{ rpm}$ ,  
 $T=343 \text{ K}$ ,  $R_p=2,025 \times 10^{-3} \text{ cm}$ )

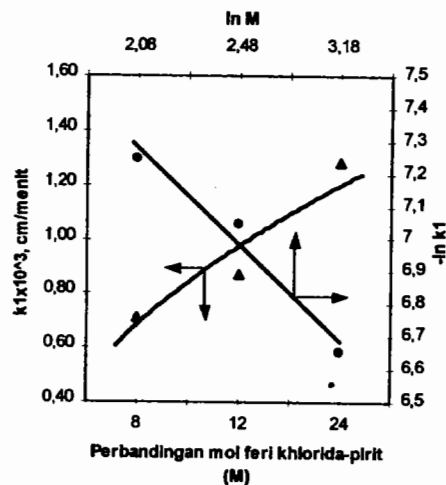
M	Waktu menit	$C_D, \text{data, mmol/cm}^3$	$C_D, \text{hitung, mmol/cm}^3 \text{ untuk}$		
			Regim campuran	Regim kimia	Regim fisis
24	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	20	0,03741	0,00922	0,02780	0,01437
	40	0,04478	0,01844	0,04957	0,02873
	60	0,04831	0,02763	0,06360	0,04310
	120	0,06481	0,05494	0,07150	0,05746
	180	0,07188	0,08185	0,07566	0,07182
	240	0,07954	0,10843	0,07776	0,08619
	300	0,09191	0,13475	0,07880	0,10055
Ralat, %			41,121	14,299	19,632
$k_2$			11,000	102,650	-
$k_L a_g$			0,080	-	1,320
12	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	20	0,03320	0,00627	0,03277	0,01974
	40	0,05110	0,01253	0,06090	0,03947
	60	0,07890	0,01880	0,08204	0,05921
	120	0,08720	0,03760	0,09641	0,07894
	180	0,09660	0,05640	0,10552	0,09868
	240	0,11610	0,07519	0,11104	0,11841
	300	0,12320	0,09397	0,11430	0,13815
Ralat, %			55,746	7,976	16,289
$k_2$			0,100	53,748	-
$k_L a_g$			0,250	-	1,253
8	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	20	0,06190	0,00533	0,02978	0,02434
	40	0,07190	0,01066	0,05802	0,04868
	60	0,09540	0,01599	0,08351	0,07301
	120	0,11430	0,03198	0,10548	0,09735
	180	0,12370	0,04796	0,12371	0,12169
	240	0,13790	0,06395	0,13833	0,14603
	300	0,14460	0,07994	0,14976	0,17037
Ralat, %			70,200	13,608	22,374
$k_2$			0,010	20,119	-
$k_L a_g$			0,269	-	0,514

$k_2, (\text{cm}^3/\text{mmol})^2/\text{menit}$

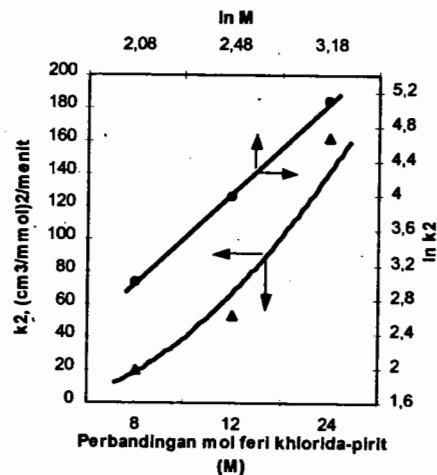
$k_L a_g, 1/\text{menit}$

Dapat dilihat dari daftar III dan IV, ralat rerata yang paling kecil adalah regim kimia. Pada daftar IV, konsentrasi fero juga meningkat dengan semakin kecil nilai  $M$ . Hal ini disebabkan oleh menurunnya nilai  $k_2$ , menyebabkan proses oksidasi ion fero menjadi feri semakin lambat, maka ion fero yang ada dalam reaktor semakin meningkat. Hal ini sesuai seperti yang dilakukan oleh King (1977), Mulyadi dan Agra (1988).

#### Hubungan $k_1$ dan $k_2$ dengan Perbandingan Mol Feri khlorida-Pirit ( $M$ )



Gambar 5. Hubungan  $k_1$  dengan  $M$



Gambar 6. Hubungan  $k_2$  dengan  $M$

Dari gambar 5 dan 6 terlihat pengaruh perbandingan mol feri khlorida-pirit ( $M$ ) terhadap konstanta kecepatan reaksi  $k_1$  dan  $k_2$  dinyatakan dengan persamaan:

$$k_1 = 2,291 \times 10^{-4} M^{0,542} \quad (14)$$

$$k_2 = 1,218 M^{1,424} \quad (15)$$

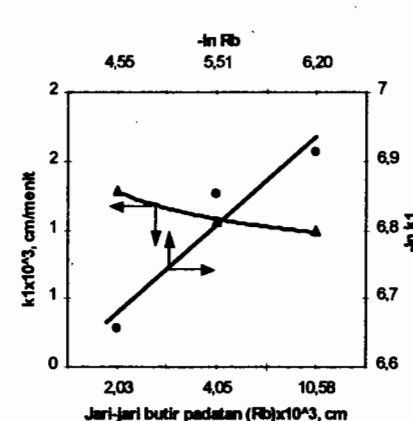
#### Pengaruh jari-jari butir padatan ( $R_b$ )

Dalam daftar V dapat disaksikan bahwa  $R_b$  berpengaruh terhadap kecepatan reaksi yang dapat dilihat dari konversi pirit yang semakin kecil pada  $R_b$  yang semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi yang terjadi adalah reaksi heterogen pada permukaan padatan. Ukuran  $R_b$  yang semakin besar akan menyebabkan luas permukaan kontak antara padatan dan cairan berkurang sehingga menurunkan kecepatan reaksi

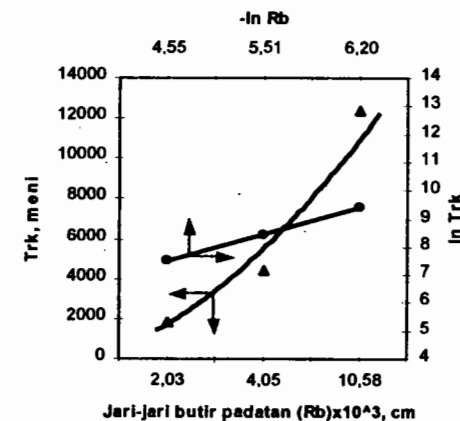
Daftar V. Pengaruh  $R_b$  dan waktu terhadap konversi pirit  
( $C_{AL} = 0,5 \text{ mmol/cm}^3$  ( $400 \text{ cm}^3$ ),  $G=326 \text{ cm}^3/\text{menit}$ ,  $N=700 \text{ rpm}$ ,  
 $M=24$ ,  $R_b = 2,025 \times 10^{-3} \text{ cm}$ )

Waktu (menit)	Konversi pirit ( $X_B$ )		
	$R_b = 2,025 \times 10^{-3} \text{ cm}$	$R_b = 4,05 \times 10^{-3} \text{ cm}$	$R_b = 1,058 \times 10^{-2} \text{ cm}$
0	0,000000	0,000000	0,000000
20	0,174665	0,046036	0,023695
40	0,222055	0,062284	0,039266
60	0,265383	0,098842	0,044992
120	0,329021	0,111028	0,067700
180	0,381826	0,124568	0,069364
240	0,440048	0,190913	0,072072
300	0,473898	0,208515	0,084674

#### Hubungan $k_1$ dan $\tau_{rk}$ dengan jari-jari butir padatan ( $R_b$ )



Gambar 7. Hubungan  $R_b$  dengan  $k_1$



Gambar 8. Hubungan  $R_b$  dengan  $\tau_{rk}$

dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$k_1 = 4,903 \times 10^{-4} R_b^{-0,1502} \quad (16)$$

Pada reaksi (1) terdapat hubungan  $\tau_{rk}$ , persamaan (5) dengan  $R_b$  yang dilukis pada gambar 8. Pengaruh  $R_b$  terhadap nilai  $\tau$  untuk reaksi kimia yang mengontrol ( $\tau_{rk}$ ) dapat disajikan dengan persamaan:

$$\tau_{rk} = 2380248,248 R_b^{1,150} \quad (17)$$

Untuk difusi melalui lapisan cairan mengontrol, hubungan  $\tau_{df}$ , persamaan (4) dengan  $R_b$

$$\tau_{df} = 916997,480 R_b^{1,091} \quad (18)$$

Sesuai yang dikemukakan oleh Levenspiel (1999), apabila reaksi kimia mengontrol maka  $\tau_{rk}$  sebanding dengan  $R_b$  dan bila difusi melalui lapisan cairan mengontrol maka  $\tau_{df}$  sebanding dengan  $R_b^{1,5-2}$ , maka dari persamaan di atas yang paling mendekati adalah persamaan (17) yaitu untuk reaksi kimia mengontrol.

### Pengaruh gabungan variabel

Persamaan gabungan pengaruh suhu (T) perbandingan mol feri khlorida-pirit (M) dan jari-jari butir padatan ( $R_b$ ) terhadap  $k_1$  dan persamaan gabungan pengaruh suhu (T) perbandingan mol feri khlorida-pirit (M) terhadap  $k_2$  dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$k_1 = 152,436e^{(-9697,004/RT)} M^{0,504} R_b^{-0,146} \quad (19)$$

$$k_2 = 2312,865e^{(-5116,914/RT)} M^{1,405} \quad (20)$$

### KESIMPULAN

1. Reaksi antara pirit dan feri khlorida adalah reaksi heterogen padat-cair yang mengikuti *Shrinking Core Model* dengan reaksi kimia yang mengontrol. Hubungan tetapan kecepatan reaksi,  $k_1$ , cm/menit dengan suhu (T), perbandingan mol feri khlorida-pirit (M) dan jari-jari butir padatan ( $R_b$ ) adalah:

$$k_1 = 2091,839e^{-4937,724/T} \text{ dengan } E_1 = 9811,258 \text{ cal/mol}$$

$$k_1 = 2,291 \times 10^{-4} M^{0,542}$$

$$k_1 = 4,903 \times 10^{-4} R_b^{-0,1502}$$

Hubungan  $\tau_{rk}$  (menit) dengan jari-jari butir padatan adalah:

$$\tau_{rk} = 2380248,248 R_b^{1,150}$$

2. Reaksi antara udara dan fero khlorida mengikuti pemodelan reaksi heterogen gas-cair dengan reaksi kimia yang mengontrol. Hubungan tetapan kecepatan reaksi,  $k_2$ , (cm<sup>3</sup>/mmol)<sup>2</sup>/menit dengan T dan M adalah:

$$k_2 = 166272,785e^{-2513,980/T} \text{ dengan } E_2 = 4995,278 \text{ cal/mol}$$

$$k_2 = 1,218 M^{1,424}$$

3. Persamaan gabungan pengaruh T, M dan  $R_b$  terhadap  $k_1$  dan persamaan gabungan pengaruh T dan M terhadap  $k_2$  dapat dinyatakan:

$$k_1 = 152,436e^{(-9697,004/RT)} M^{0,504} R_b^{-0,146} \quad , \text{cm/menit}$$

$$k_2 = 2312,865e^{(-5116,914/RT)} M^{1,405} \quad , (\text{cm}^3/\text{mmol})^2/\text{menit}$$

yang berlaku untuk T = 313 hingga 343 K, M = 8 hingga 24, dan  $R_b = 2,025 \times 10^{-3}$  hingga  $1,058 \times 10^{-2}$  cm,  $C_{AL}$  0,5 mmol/cm<sup>3</sup> sebanyak 400 cm<sup>3</sup>, G = 326 cm<sup>3</sup>/menit, N = 700 rpm.

4. Kondisi yang relatif baik dalam penelitian ini adalah t = 300 menit, T = 343 K, M = 24,  $R_b = 2,025 \times 10^{-3}$  cm,  $C_{AL}$  = 0,5 mmol/cm<sup>3</sup> sebanyak 400 cm<sup>3</sup>, G = 326 cm<sup>3</sup>/menit dan N = 700 rpm dengan konversi yang didapat 47,390%.

### DAFTAR DAN ARTI LAMBANG

- $a_g$  = luas permukaan gelembung gas per satuan volume, cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>
- $C_{AL}$  = konsentrasi feri khlorida dalam fase cair, mmol/cm<sup>3</sup>
- $C_D$  = konsentrasi fero khlorida, mmol/cm<sup>3</sup>
- $C_{Og}$  = konsentrasi oksigen dalam fase gas, mmol/cm<sup>3</sup>
- $C_{OIL}$  = konsentrasi oksigen dalam fase cair pada lapisan batas gas-cair, mmol/cm<sup>3</sup>
- $C_{OL}$  = konsentrasi oksigen dalam fase cair, mmol/cm<sup>3</sup>
- $D_A$  = koefisien difusi feri khlorida dari cairan ke permukaan butir padatan, cm<sup>2</sup>/menit
- G = kecepatan aliran udara, cm<sup>3</sup>/menit
- H = konstanta Henry, (mmol/cm<sup>3</sup> gas)/(mmol/cm<sup>3</sup> cairan)
- $k_1$  = konstanta kecepatan reaksi pada permukaan butir padatan (12), cm/menit
- $k_2$  = konstanta kecepatan reaksi (13), cm<sup>3</sup>/mmol.menit
- $k_L$  = koefisien perpindahan massa pada fase cairan, cm/menit
- $k_{SL}$  = koefisien perpindahan massa cairan ke permukaan butir padatan, cm/menit
- $k_r$  = konstanta kecepatan reaksi keseluruhan, (mmol/cm<sup>3</sup>)<sup>1-n</sup>/menit
- M = perbandingan mol feri khlorida-pirit
- N = kecepatan pengadukan
- $R_b$  = jari-jari butir padatan, cm
- t = waktu, menit
- $t_i$  = waktu untuk reaksi keseluruhan yang mengontrol, menit
- $t_{dc}$  = waktu untuk difusi cairan ke permukaan padatan yang mengontrol, menit
- $t_{rk}$  = waktu untuk reaksi kimia yang mengontrol, menit
- T = suhu mutlak, K
- $X_B$  = konversi pirit
- $\rho_B$  = jumlah mol B per satuan volume padatan, mmol/cm<sup>3</sup>
- $\tau$  = waktu yang digunakan untuk reaksi sampai  $X_B = 1$ , menit
- $\tau_{dc}$  = waktu yang digunakan untuk reaksi sampai  $X_B = 1$  untuk difusi lapisan cairan yang mengontrol, menit
- $\tau_{rk}$  = waktu yang digunakan untuk reaksi sampai  $X_B = 1$  untuk reaksi kimia mengontrol, menit

**DAFTAR PUSTAKA**

- Johnstone, R.E. and Thring, M.W., 1957, *Pilot Plants, Models and Scale-Up Methods in Chemical Engineering*, 1 st ed., pp. 66-71, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- King Jr, W.E. and Perlmutter, D.D., 1977, "Pyrite Oxidation in Aqueous Ferric Chloride", *AIChE Journal*, 23, 679-685.
- Levenspiel, O., 1999, *Chemical Reaction Engineering*, 3 ed., pp. 390, 521-607, John Wiley and Sons, New York.
- Mulyadi, E., dan Agra, I.B., 1988, "Kinetika Reaksi Oksidasi Pirit dalam Larutan Feri Sulfat", *BPPS-UGM*, 4(1), 683-699.
- Smith, J.M., 1981, *Chemical Engineering Kinetics*, 3 ed., pp. 415-434, McGraw-Hill International Book Company, Tokyo.
- Vogel, A.I., 1978, *Quantitative Inorganic Analysis*, 4 ed., pp. 351-354, 504-507, Longmans, Green and Co., New York.